



基于地源热泵的高效冷热源系统方案

重庆大学 陈金华 教授 / 博导
c66578899@126.com



目 录

- 1 项目基本情况
- 2 地源热泵系统设计
- 3 系统运行策略优化设计
- 4 运行情况
- 5 总结

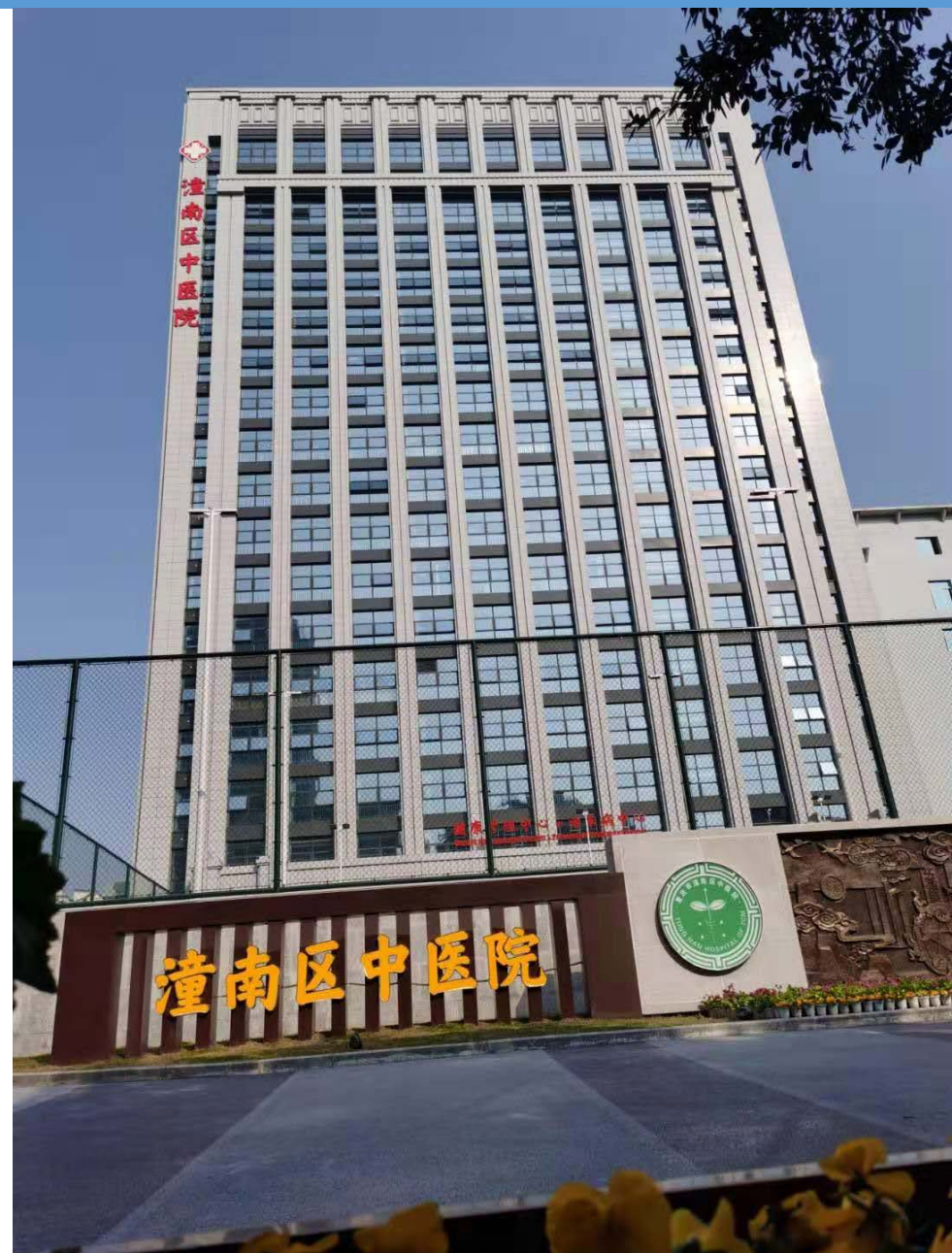


Part 01

项目基本情况

01 /项目基本情况—工程概况

- **医院综合大楼**，位于重庆潼南区，该建筑与医院原有建筑贴邻建造。
- 总建筑面积约56186m²，地上面积为40303.66m²
- 地上20层，地下2层，建筑高度74.70m。
- **空调面积：32464.8m²**
- 设计**床位数600床**





01 /项目基本情况—基本特点



地源热泵系统设计

在设计与运行地埋管地源热泵系统时，一般将建筑的负荷特性视为设计的基础。负荷特性关系到系统运行时**土壤热平衡、系统能效比、系统调节性能**等多个重要参数。



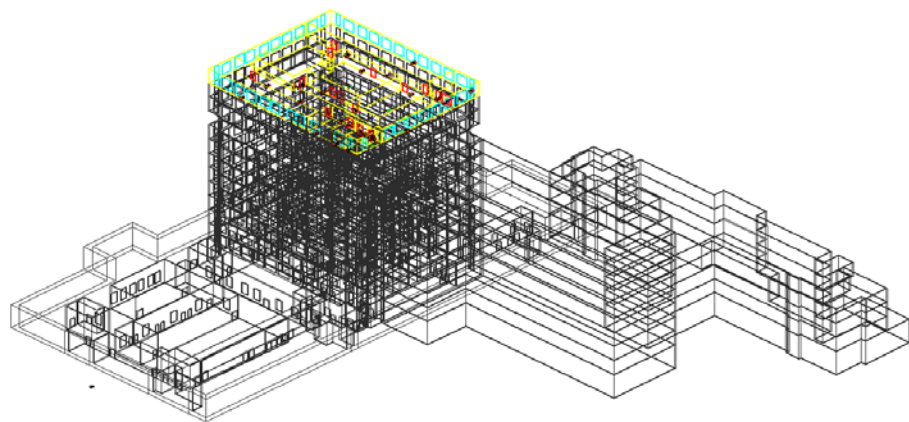
医疗建筑负荷特征复杂

医疗建筑作为一种特殊的公共建筑，其具有功能复杂，人员活动规律多变，用能种类多样，仪器安装功率大，运行时间长等特点。因此医疗建筑具有**能耗用量巨大、负荷特征复杂**的特点。医院建筑能耗是一般公共建筑的**1.6~2倍**。

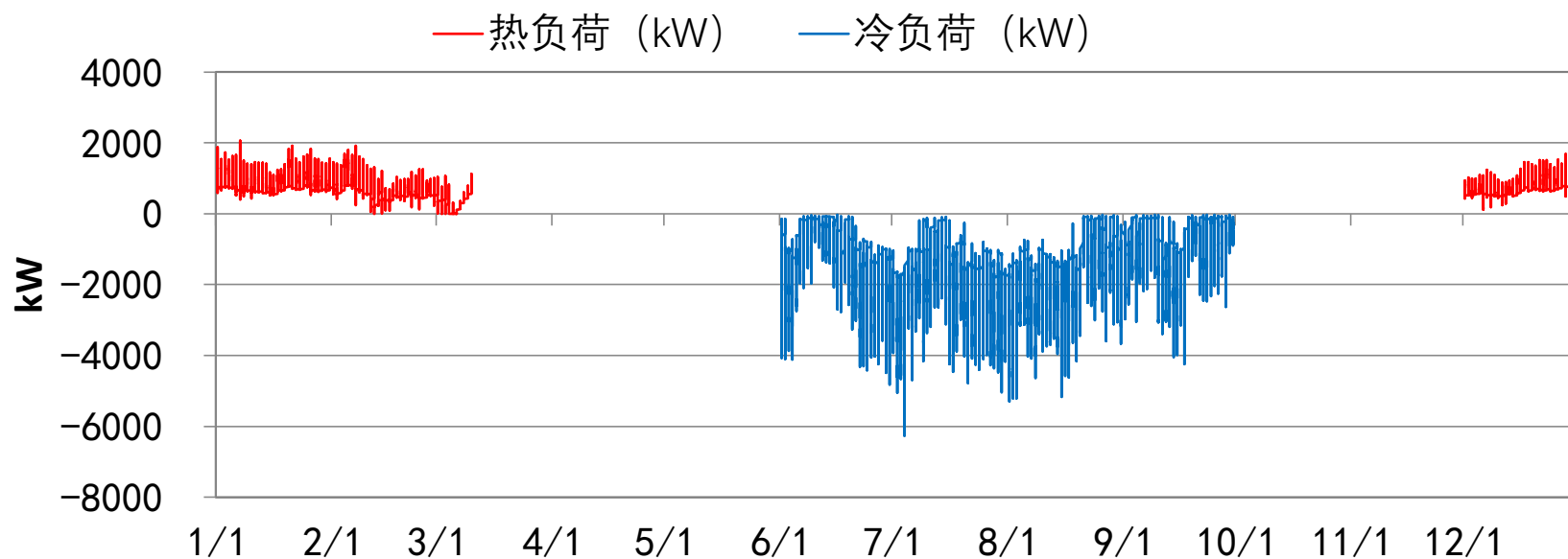
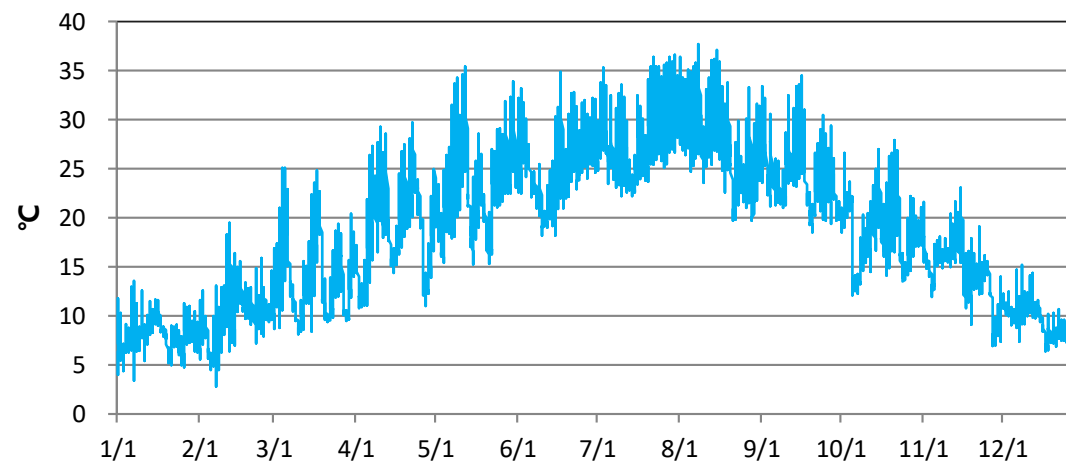


01 /项目基本情况——全年动态负荷模拟

DeST模型



典型气象年逐时气象参数



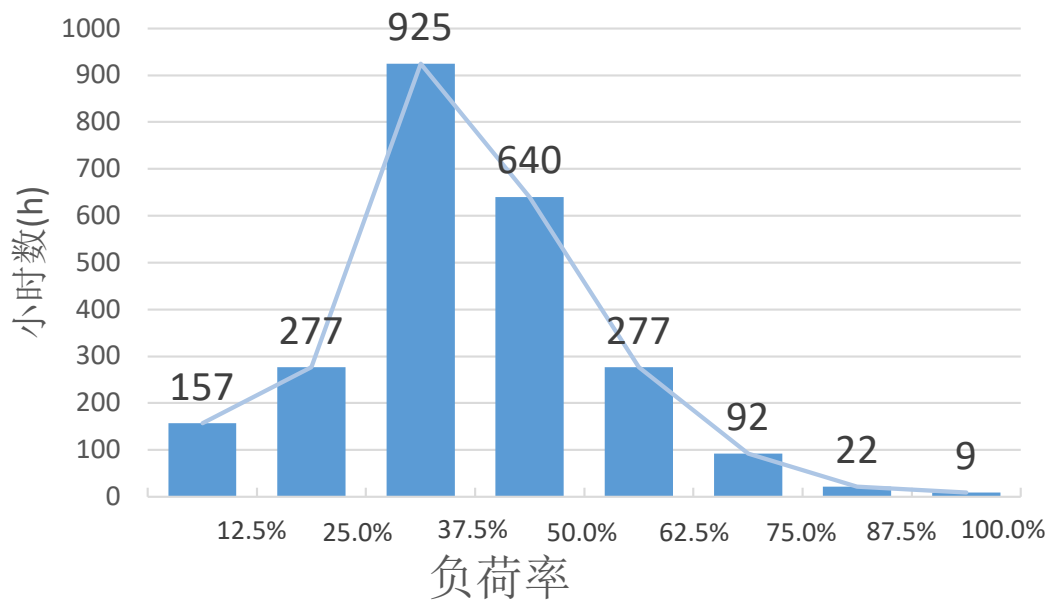


01 /项目基本情况——模拟结果

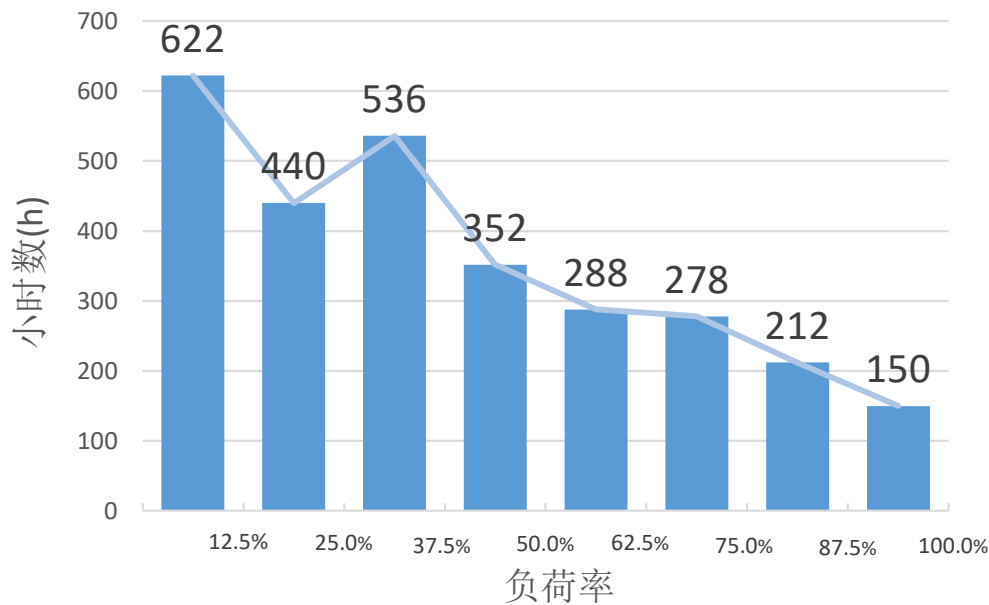
项目统计	单位	统计值
总建筑空调面积	m ²	32464.84
全年最大热负荷	kW	2127.02
全年最大冷负荷	kW	6264.42
供热季累计热负荷	MW·h	<u>1781.56</u>
供冷季累计冷负荷	MW·h	<u>5110.42</u>
供热设计负荷	kW	<u>2057</u>
供冷设计负荷	kW	<u>4788</u>

- 夏季累积冷负荷为冬季的**2.87倍**
- 考虑一定的不满足率，设计冷热负荷为**4788kW**和**2057kW**。
- 冬季负荷出现的频率较为**集中**，有79.9%的时刻其负荷在12.5%~62.5%的负荷率区间
- 夏季负荷出现的频率较为**分散**，有78.3%的时刻其负荷在62.5%以下的负荷率区间

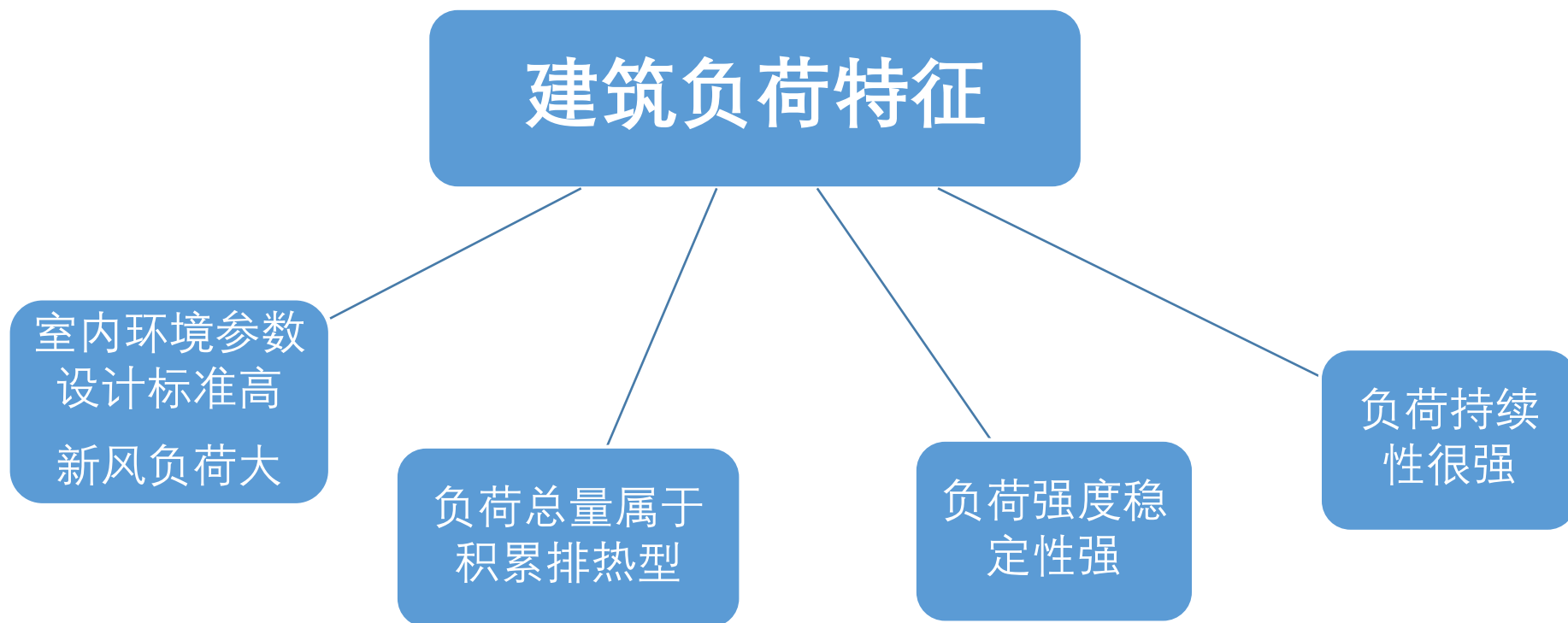
冬季



夏季



01 /项目基本情况——负荷特征总结



总结：重庆地区医疗建筑的负荷特征对单一地埋管地源热泵系统运行**不利**，需要通过设置**辅助散热措施、完善运行控制方式**等手段提高系统能效，保证安全运行。

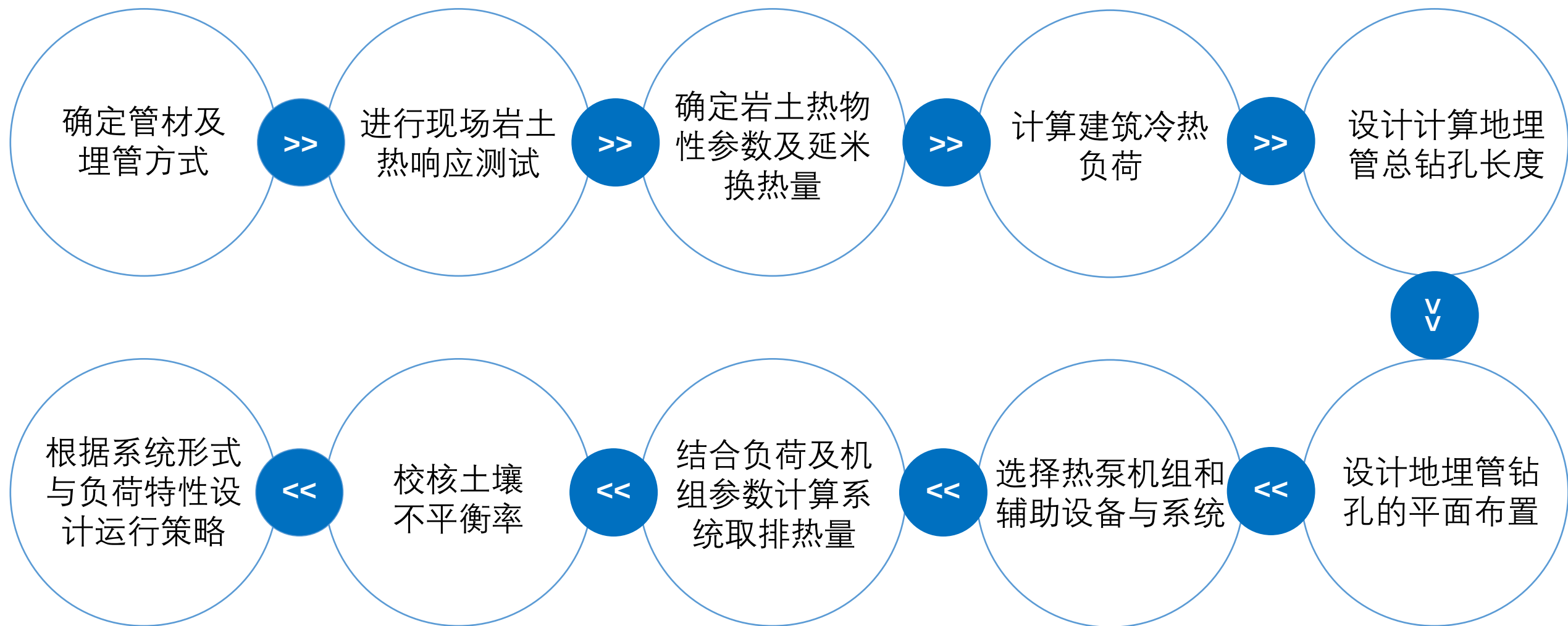


Part 02

地源热泵系统设计



02 / 地源热泵系统设计——一般设计步骤



存在的不足

- 热响应测试中将项目所在地岩土视为统一均匀换热介质，未考虑岩土竖直分层的影响，所测得的岩土热物性参数，**延米换热量存在误差**
- 由于项目用地面积限制，地埋管钻孔间距较小，钻孔之间热干扰对换热量影响较大，从而造成**管群总换热量存在误差**
- 地埋管管群的换热参数（流量、换热温差、换热量等）与机组匹配性不好，造成运行时**工况偏离设计点**
- 对部分负荷下的系统**运行控制策略考虑不足**，地埋管与辅助冷热源的配合不好，以至于不能发挥出该系统的节能潜力

管群换热计算方法

1

计算单位井 深换热量

利用FLUENT软件，模拟计算某工况下的单位井深换热量。该换热量被称为“**单位井深基础换热量**”

2

管群分区

按照各个埋管**周围埋管数量的不同**，将管群划分为若干个不同的区域，并排布统计各个区域的埋管数量

3

Kelvin线 热源理论

该理论将钻孔形成的热扰转化为附加热阻。可利用该理论，计算长期运行的钻孔，其自身及周围其他钻孔所产生的**附加热阻**。

4

计算附加 热阻

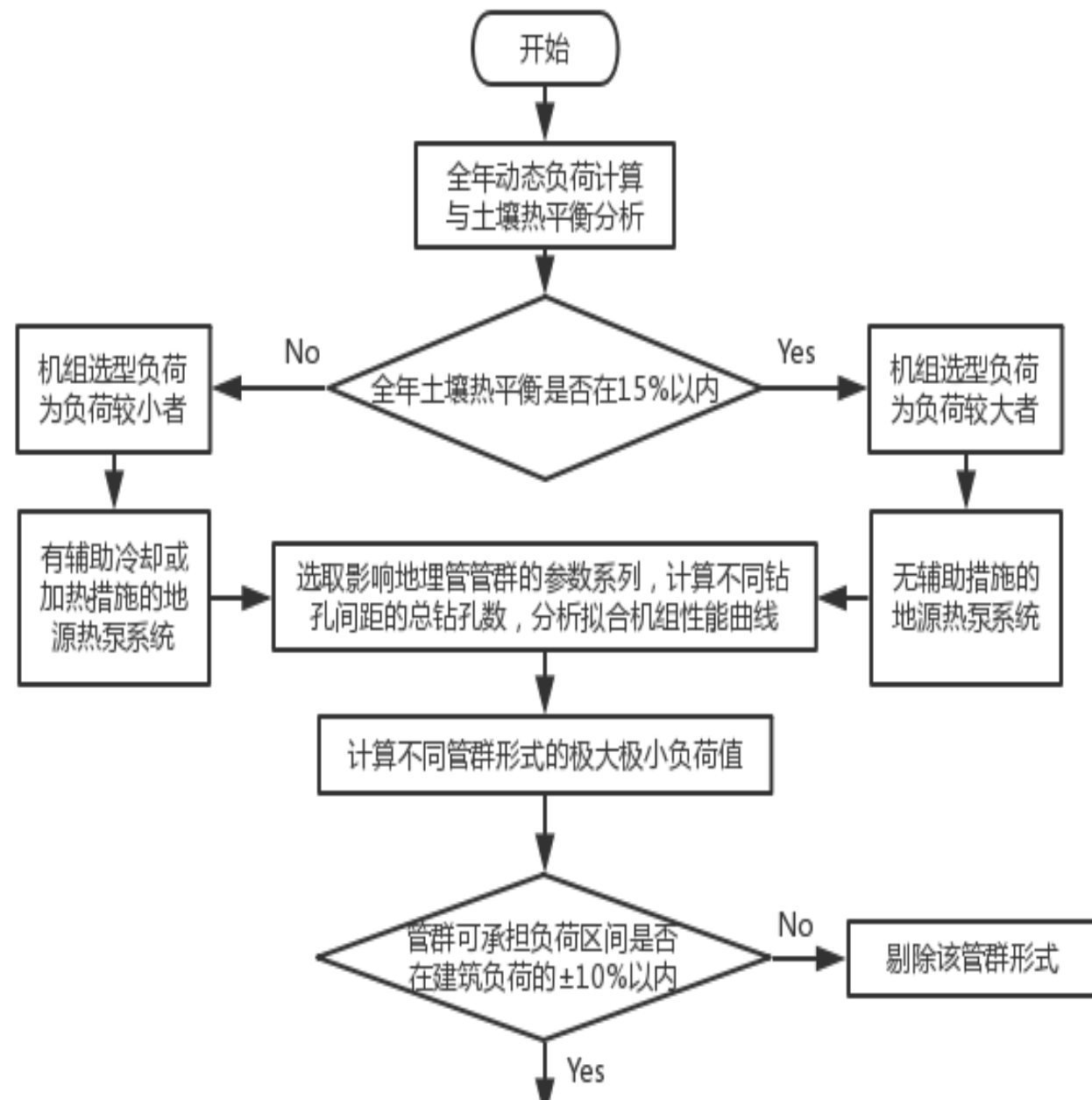
利用Kelvin线热源理论计算附加热阻，并计算管群不同区域钻孔的“**换热量修正系数**”。假设热阻增加 $m\%$ ，则换热量减少 $m\%/(1+m\%)$

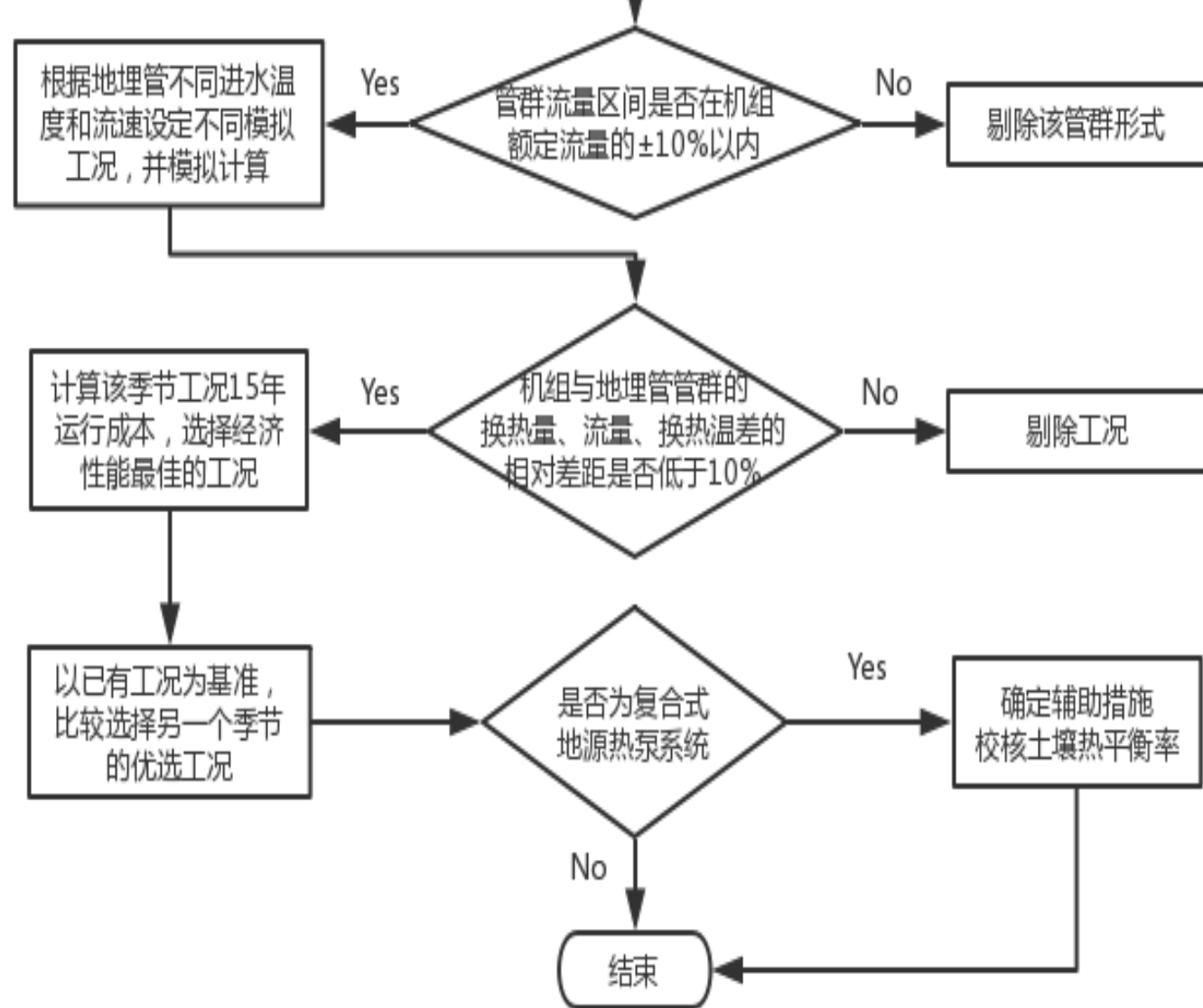
5

管群换热 计算

综合各个区域的埋管数、单位井深基础换热量、换热量修正系数，即可得到管群**修正后的总换热量**和**换热温差**

02 / 地源热泵系统设计——优化设计流程

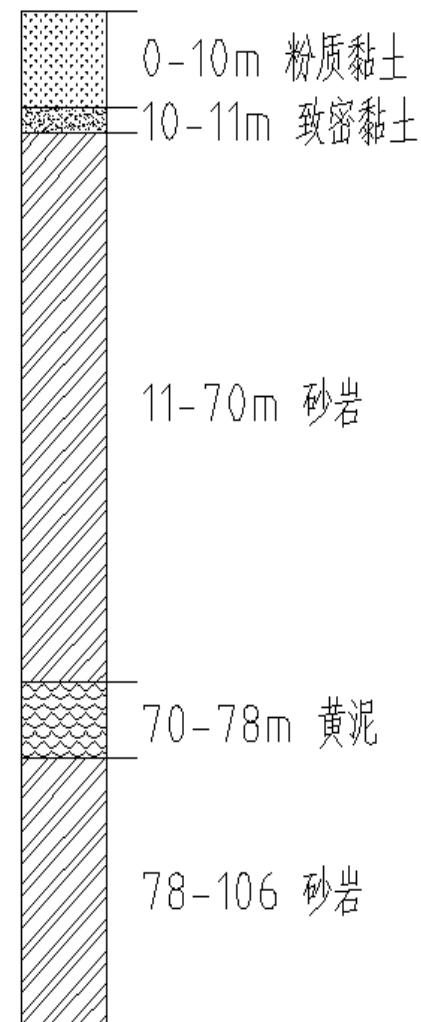




02 / 地源热泵系统设计——地埋管换热模型建立

实验简介

- 于2017年5月，对两口试验井进行岩土热响应试验
- 实验采用恒热流方法，在地埋管进出口埋设温度传感器，并在地下距地5m、10m、20m、30m、40m、50m、60m、70m、80m、100m的供回水管处埋设温度测点。测试期间每5分钟测试1组数据。
- 在试验期间，陆续对两口井的单双U工况进行热响应测试。
- 地勘显示，地质结构有分层现象，主要由砂岩构成



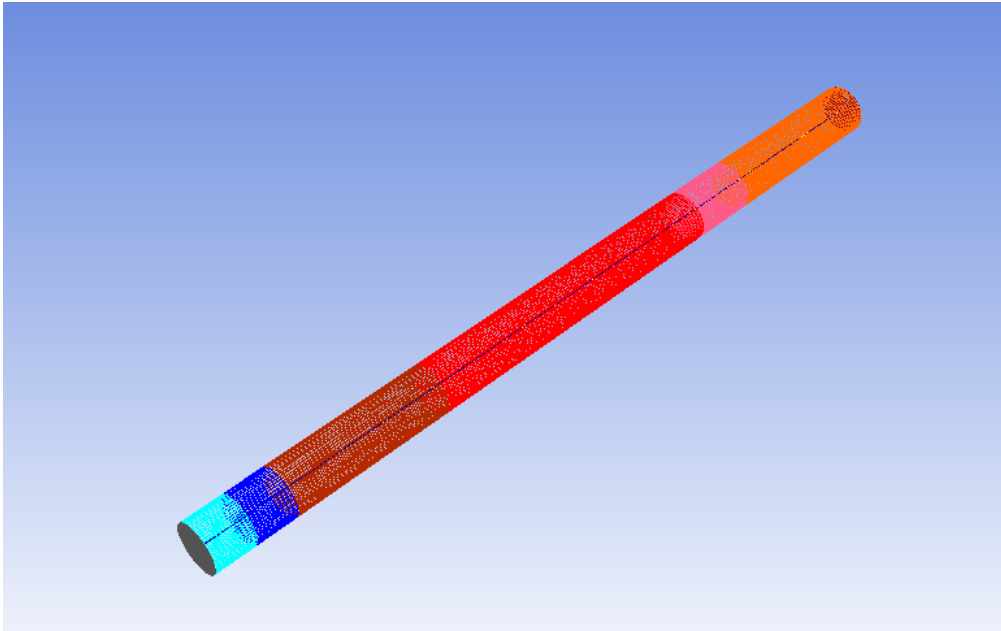
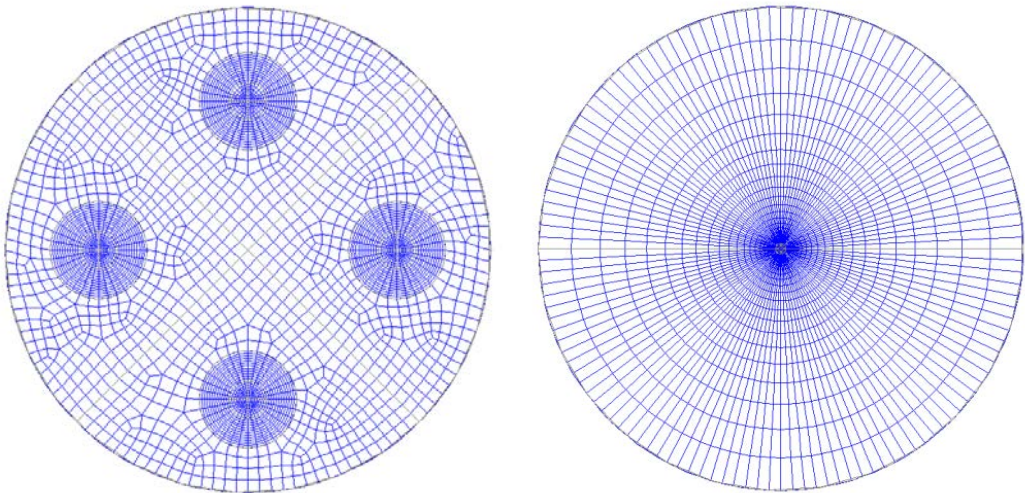


地埋管分层换热模型

- 结合地质分层位置及温度测点位置，根据不同深度温度测试结果，计算土壤分层热阻，以热阻变化率大于3%为分层依据，将土壤分为6层

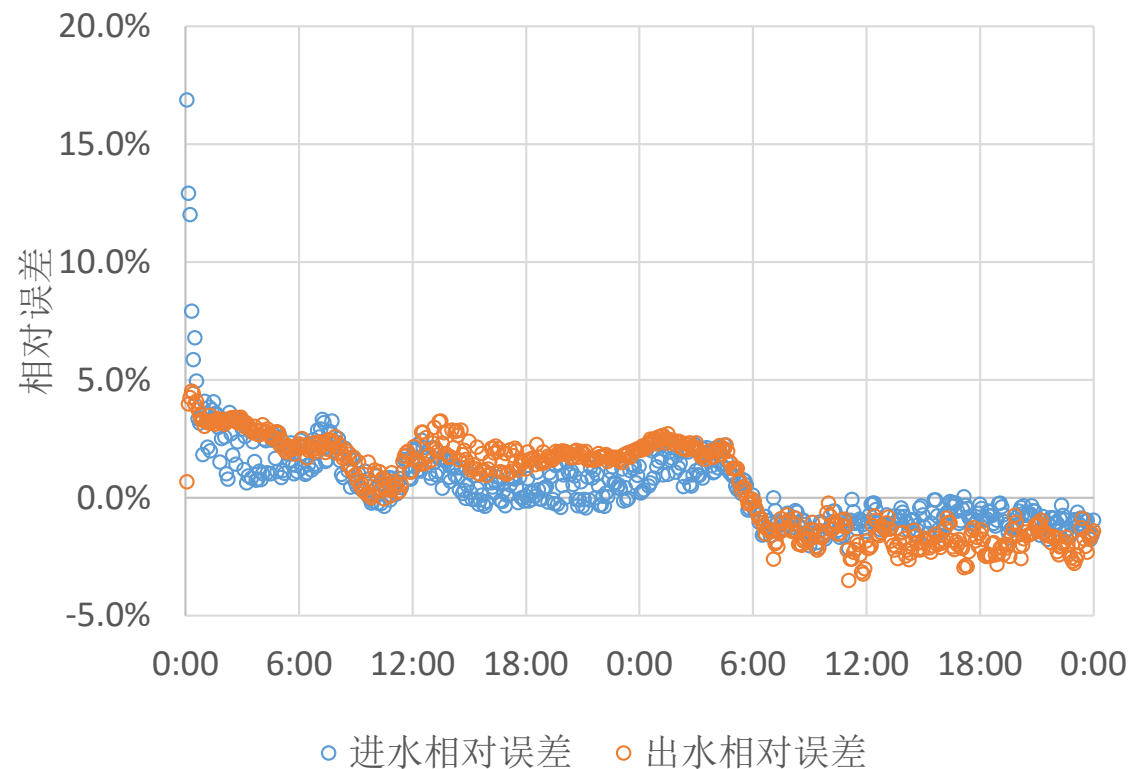
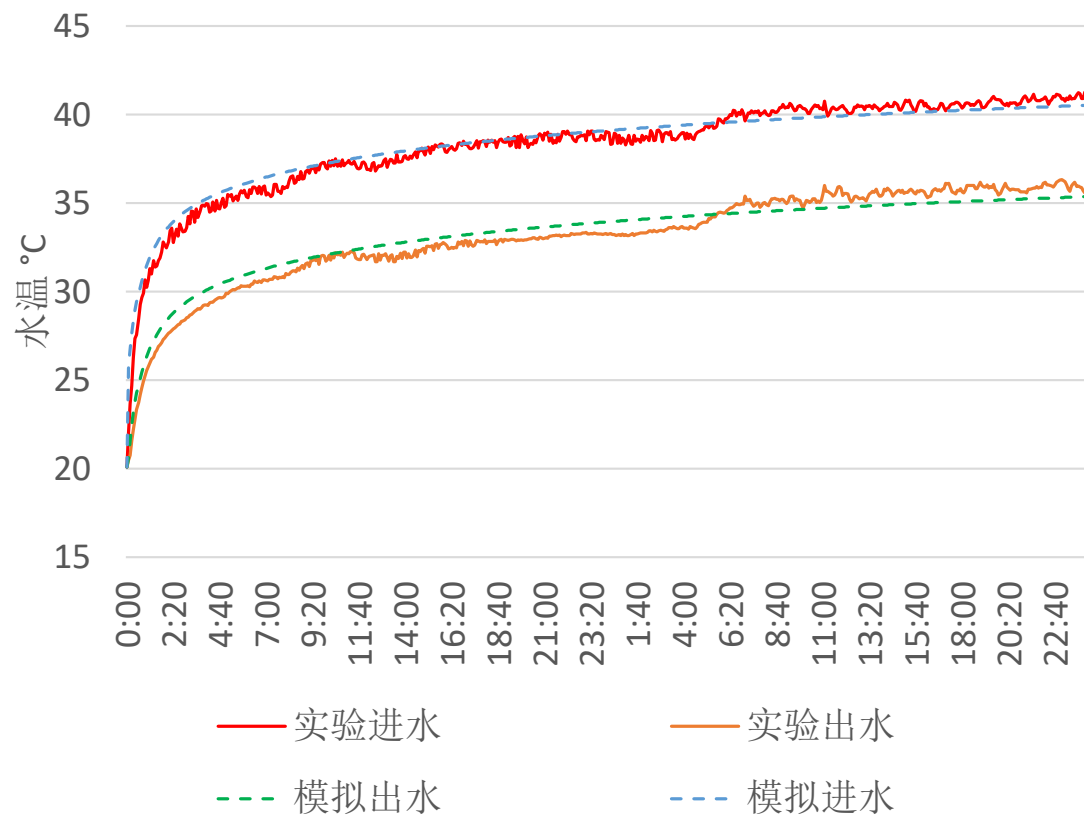
编号	土壤类型	深度区间 m	导热系数 W/(m·K)	容积比热 J/(m³·K)	土壤热阻 (m·K)/W
I	粉质粘土	0~5	1.38	2306465	0.2311
II	粉质粘土	5~10	2.23	1656325	0.1756
III	砂岩	10~30	2.46	2507606	0.1462
IV	砂岩	30~70	2.53	2502736	0.1429
V	黄泥	70~78	2.18	2692897	0.1575
VI	砂岩	78~100	2.03	2007203	0.1781

地埋管分层换热模型及其分层方法，详见：
陈金华 《竖直双U地埋管换热器分层换热模型研究》
霍侦侦 《竖直地埋管换热器分层换热模型分层方法研究》



模拟数据

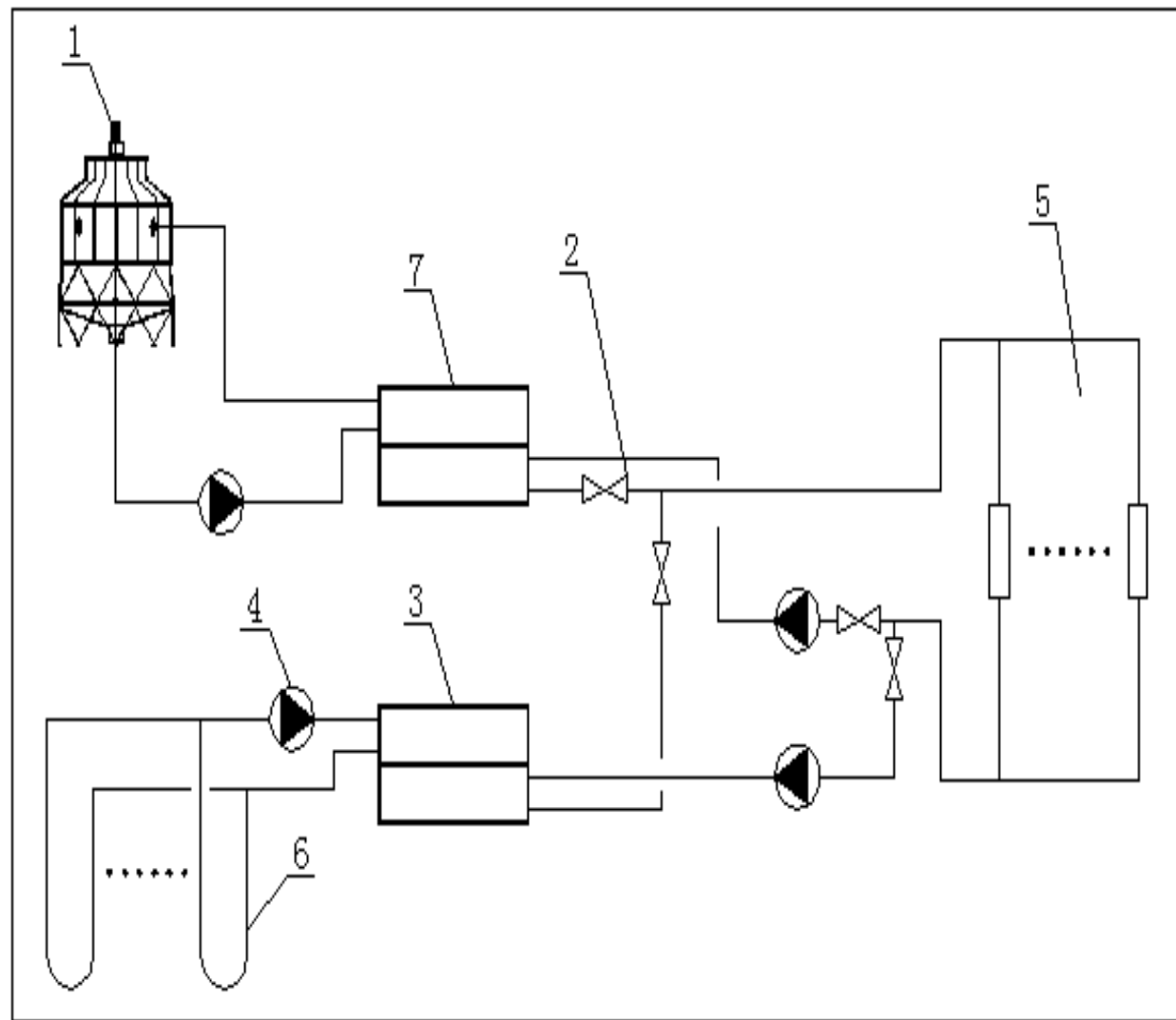
利用其中一口井的实验数据进行验证。比较模型与实测的进出水温度的差距，评价两者的匹配情况。



可以认为实测数据与模拟数据的**差值**服从正态分布，并利用T检验量，通过计算可判断，进出水温度模拟数据与实测数据的拟合性较好。

设计参数

- 热响应测试结果表明，项目现场岩土原始平均温度 20.29°C ，综合导热系数 $2.31\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，综合体积比热容为 $5.92\times 10^6\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$
- 夏季地埋管设计进出水温度为 **$30/35^{\circ}\text{C}$** ，冬季地埋管设计进水温度为 **$12/7^{\circ}\text{C}$** ，管内设计流速 **0.45m/s** 。
- 空调系统夏季冷负荷为 **7124.80kW** ，冬季热负荷为 **2740.49kW** (负荷计算软件结果，非DeST模拟)
- **DN32双U**埋管共**394口**，埋管间距**4m**，埋深**100m**



系统方案

复合式系统：为保证长期运行的换热效率，冷热源采用**辅助冷源的复合式地源热泵系统**。选择2台螺杆式地源热泵机组，2台离心式冷水机组。

分区运行：同时为适应负荷特性，将地埋管分为6个分区，可实现**分区运行**。

水力平衡：在地源侧加入二级分集水器，埋管采用**同程式系统**。

避免热损失：地埋管回水管及水平管**保温**。

保障系统通畅：地埋管**排气**。

热平衡分析

由于建筑冷负荷明显高于热负荷，夏季采用地埋管+冷却塔联合供冷，机组选型后校核冬夏季取排热不平衡率，此时冬夏季不平衡率为**9.42%**，小于10%，满足冬夏平衡要求

02 / 地源热泵系统一般设计——设备选型

设 备	设计工况下设备运行参数	数量（台）	备注
离心式冷水机组	制冷量2737.8kW，制冷功率547.8kW， 制冷COP 5.68 ， 冷冻水进/出水温度12/7℃，冷却水进/出水温度32/37℃；	2	
螺杆式地源热泵机组	制冷量1605kW，制冷功率287.1kW， 制冷COP 5.59 ， 冷冻水进/出水温度12/7℃，地源侧进/出水温度30/35℃； 制热量1669kW；制热功率369.4kW， 制热COP 4.52 ， 热水进/出水温度40/45℃，地源侧进出水温度12/7℃。	2	2台机组夏季 实际总供冷 量1755kW
冷却塔	流量900m ³ /h，功率30kW，塔体扬程4.6m	2	
地源测水泵	流量325m ³ /h，扬程25m，功率37kW，转速1480rpm	3	变频
热泵用户侧水泵	流量320m ³ /h，扬程32m，功率45kW，转速1480rpm	3	变频，两用 一备
冷水机组用户侧水泵	流量540m ³ /h，扬程32m，功率75kW，转速1480rpm	2	变频
冷却塔侧水泵	流量720m ³ /h，扬程20m，功率55kW，转速1480rpm	2	变频

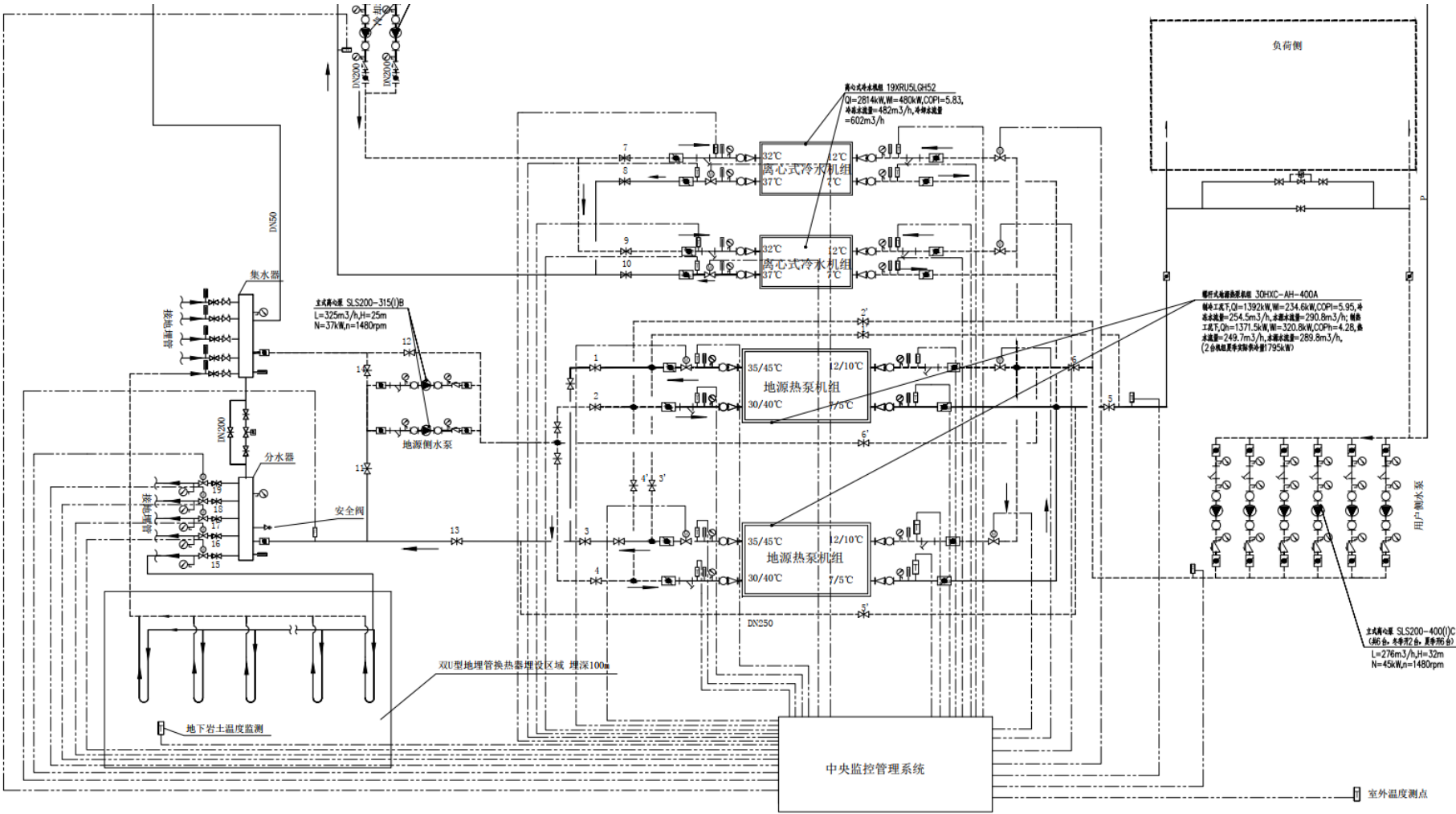
02 / 地源热泵系统设计——监控系统

监测参数

- 埋管侧/冷却水进出水温及流量监测
- 用户侧进出水温及流量监测
- 地下岩土温度监测
- 冷却塔侧流量监测
- 室外温度监测

控制逻辑

- 通过进出水温差及流量得到机组制冷/热量，根据实际情况实现**热泵机组的启停控制**
- 通过地下岩土温度监测得到土壤换热性能状况，实现**热泵机组的启停控制**
- 通过室外温度监测，结合用户侧与机组侧、地源测、冷却塔侧的进出水温及流量实现**水泵变频运行**





Part 03

系统运行策略优化



1. 充分利用**室外空气的天然冷源**，提高运行效率

2. 改善地埋管换热器的**换热效果**

3. 维持地埋管换热器周围岩土的**热平衡**

利用冷却塔的高效运行时段
在短期内与长期运行中，尽可能提高地埋管的换热效果

调峰控制

以冷却塔或地埋管中的**一种作为建筑的主要冷源**。当该主要冷源出力不足时，开始使用另一种冷源来补充使用

时间控制

时间控制控制逻辑是在一天中某个**特定的时间段开启**冷却塔辅助散热系统，而在该设定时间之外，冷却塔辅助散热系统关闭。

定温控制

当热泵机组的**进水口温度**超过设定值时，开启冷却塔系统辅助散热。当温度恢复到该设定值时，关闭冷却塔系统，只使用地埋管地源热泵系统。



温差控制

温差控制的控制策略主要是比较热泵**进口温度和大气温度**之间的关系。当热泵机组的进水口温度和室外干球或湿球温度的差值大于设定值时，开启冷却塔辅助散热系统进行辅助散热，当该差值恢复到设定值时，关闭冷却塔辅助散热系统。

其他控制方法

- 夏季制冷以冷却塔为主的控制方法
- 基于土壤温度的控制方法
- 基于土壤热平衡的方法
- 过渡季节土壤蓄冷
-



03 / 系统运行策略优化——常用控制策略的弊端

调峰控制

- 对冬夏季不平衡性考虑不足
- 造成系统长期运行后失效

时间控制

- 控制方法不灵活
- 不能充分利用冷却塔高效时段

定温控制

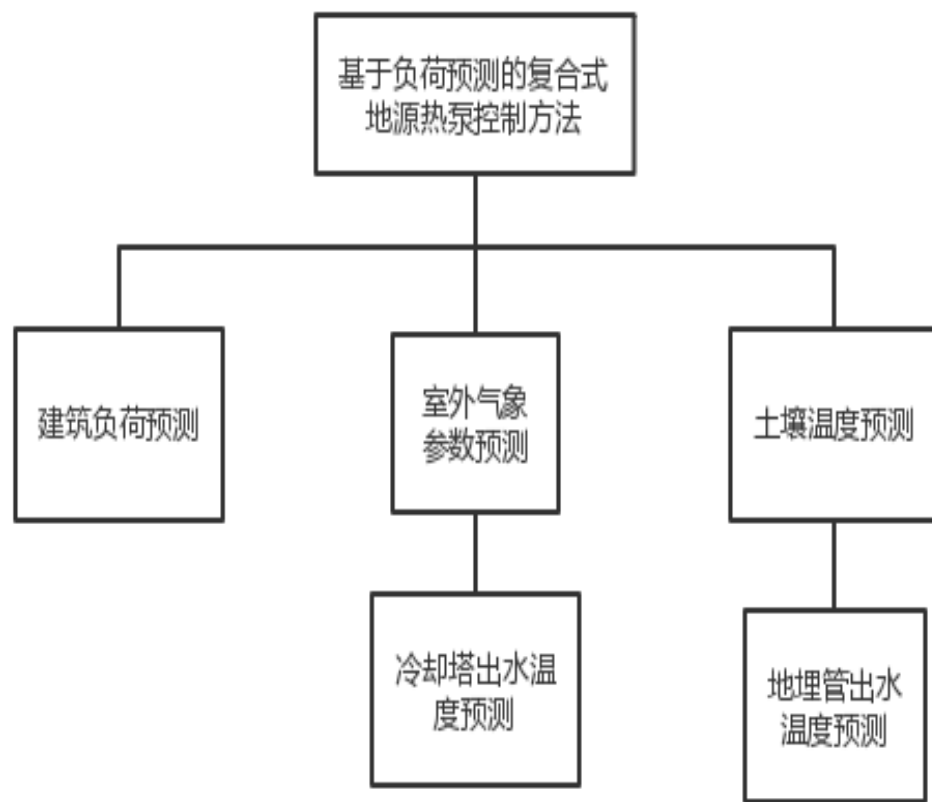
- 仅考虑冬夏季不平衡的问题
- 系统能效可能不是最优

温差控制

- 控制具有实时性
- 没有完全发挥出系统节能潜力

03 / 系统运行策略优化——负荷预测控制策略的组成结构

负荷预测控制策略的组成结构



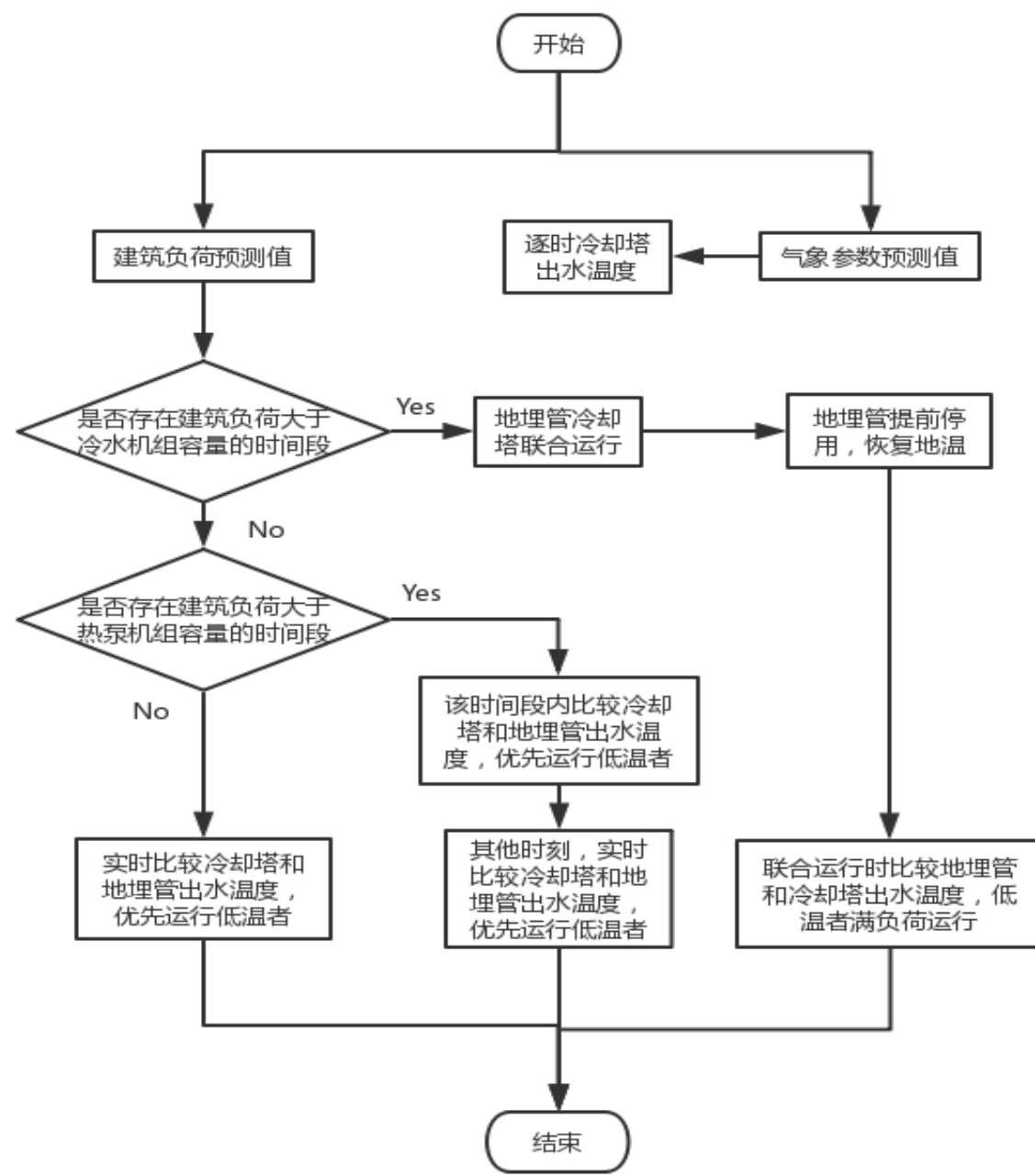
主要控制思想

- 根据建筑负荷和参数预测结果，实时变化地确定未来一段时间的系统运行状况。目标为**总能耗最小**。
- 针对不同未来时间段的关注点不同。
- 短期内（24h），保证在高温高负荷时段，高效使用地埋管，低温时段，高效利用冷却塔。
- 中期（1周），关注气温和负荷的整体变化趋势，提前安排土壤温度恢复。
- 长期（1个月及以上），考虑土壤热平衡问题。

各主要组成部分的可行性

- 建筑短期**负荷预测技术**已经**较为成熟**，基本可以满足空调系统的控制需求。
- 现阶段我国气象部门可以提供未来24h的**短期逐时气象预报**，且预报**准确度较高**。
- 结合过去时刻的地埋管使用情况，运用**叠加原理**，可以对地埋管的出水温度进行预测。

03 / 系统运行策略优化——负荷预测短期控制方法



Part 04

运行情况



04 / 运行情况——实测数据

检测地点	重庆潼南中医院		
检测内容	用户侧、地源侧水流量	检测日期	2021/3/5
检测依据	《公共建筑节能检测标准》(JGJ/T 177-2009)		
检测设备	超声波流量计	委托编号	
时间	用户侧水流量 (m³/h)	地源侧水流量 (m³/h)	
10:00	284.72	205.19	
10:10	286.26	207.57	
10:20	284.41	206.11	
10:30	283.08	205.48	
10:40	286.03	203.31	
10:50	286.17	207.33	
11:00	285.24	203.80	

检测地点	重庆潼南中医院		
检测内容	机组功率	检测日期	2021/3/5
检测依据	《公共建筑节能检测标准》(JGJ/T 177-2009)		
检测设备	功率计	委托编号	
时间	机组 (kW)	用户侧水泵 (kW)	地源侧水泵 (kW)
10:00	299.531	19.184	35.940
10:10	299.557	19.141	35.408
10:20	299.498	18.874	36.068
10:30	298.433	19.372	35.527
10:40	298.013	19.302	36.320
10:50	299.334	19.149	35.940
11:00	299.283	18.731	36.406
11:10	299.594	19.275	35.582
11:20	299.871	18.757	35.344
11:30	298.883	19.391	35.244
11:40	299.979	18.600	35.612
11:50	299.239	19.432	35.584
12:00	298.337	19.447	35.496

检测地点	重庆潼南中医院		
检测内容	用户侧进/出水温度	检测日期	2021/3/5
检测依据	《公共建筑节能检测标准》(JGJ/T 177-2009)		
检测设备	铂电阻温度计	委托编号	
时间	用户侧进水温度 (℃)	用户侧出水温度 (℃)	地源侧进水温度 (℃)
10:00	39.49	35.34	8.39
10:10	39.41	35.26	8.46
10:20	39.42	35.33	8.32
10:30	39.45	35.21	8.32
10:40	39.47	35.33	8.29
10:50	39.42	35.29	8.44
11:00	39.39	35.24	8.43
11:10	39.49	35.31	8.34
11:20	39.36	35.35	8.24
11:30	39.42	35.22	8.33
11:40	39.37	35.22	8.30
11:50	39.30	35.22	8.37

于**2021年3月**，对重庆市潼南区中医院进行了**用户侧水流量及进出水温度、地源侧水流量及进出水温度、热泵机组功率、用户侧及地源侧水泵功率**进行了测试。



04 / 运行情况——结果分析

结果

负荷率80%

参数	冬季系统实测值
测试期间机组总功率(kWh)	5830.68
测试期间系统能耗(kWh)	6899.91
测试期间机组平均COP	4.55
测试期间系统平均COP	3.84

分析

- 1、机组实际运行能效与额定能效接近。
- 2、水泵能耗约占热源系统能耗16%。
- 3、负荷侧温差略偏小，约4.1℃；地源侧换热温差较大，约6.1℃，可进一步优化运行，进一步提高主机和系统能效。

Part 05

总结



05 / 总结

- 建筑负荷特性是系统方案及运行策略设计的基础。
- 地埋管换热性能作为地源热泵运行能效的重要影响因素，需建立合理的**换热模型**，对系统方案(**埋管间距、埋管形式、管内流速、地埋管进口温度**等)进行准确评估。
- 由于钻孔间的热干扰作用，管群换热量需采用理论进行**修正**，并满足管内流速与承担建筑负荷要求。
- 热泵**机组运行参数**(制热量、换热温差、流量)主要受机组进口温度影响，修正后的运行参数需**与管群**换热量、换热温差、流量相**匹配**。
- 复合式地源热泵系统需从**负荷预测、冷却塔出水温度预测、地埋管出水温度预测**综合出发，从而充分保证**土壤热平衡**与**系统整体能效**。
- 地埋管**管群设计**需要充分考虑分区运行、水力平衡、管路排气、冷热损失等问题。



谢谢各位

重庆大学 陈金华 教授 / 博导
c66578899@126.com